تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷
Volume 14, No. 3, Fall 2018 (IR-WRR)
۷۱-۸۴

مدل‌سازی بیلان عمومی ماهانه با تلفیق مدل‌های بیلان هیدروکلیماتولوژی و تانک زیرزمینی

محمدرضا معینی[۱] و بنفشه زهرایی[۲*]

چکیده

تعریف دقیق بیلان آبی حوضه‌های آبریز کشور، از ضرورت‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر واقعیت و توسعه پایدار است. سوابق تحقیقاتی در مورد مدل‌های بیلان ماهانه عمدتاً معطوف به مدل‌های بیلان هیدروکلیماتولوژی است که منابع آب زیرزمینی را به شکل بسیار محدود و تنها به صورت یک‌لایه یا دولایه از خاک در نظر می‌گیرند که قابلیت ذخیره آب را در فضای خالی بین ذرات خود دارند. از این رو، توسعه مدل‌هایی که اثر بیلان آب زیرزمینی را به طور همزمان با بیلان هیدروکلیماتولوژی در نظر بگیرند، می‌تواند در ارائه تصویر دقیق‌تری از منابع آب هر حوضه مفید باشد. در مدل پیشنهادی در این تحقیق سعی شده آبخوان توسط مدل بیلان تانک زیرزمینی مدل‌سازی شود که به مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی متصل شده و پارامترهای دو مدل به طور همزمان بهینه‌سازی شوند. انتظار می‌رود با این رویکرد، تبادلات آب بین منابع آب سطحی و زیرزمینی نسبت به حالتی که دو مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی و زیرزمینی به شکل جداگانه آموزش داده شوند، به شکل واقع بینانه‌تری برآورد شوند. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل توسعه داده شده پیشنهادی استفاده شده است. جهت ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی، این مدل در محدوده مطالعاتی نیشابور واقع در حوضه‌ی آبریز کویر مرکزی برای ۹ سال آبی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن ارزیابی شده است. نتایج این تحقیق، نشان‌دهنده پتانسیل قابل توجه رویکرد پیشنهادی برای مدل‌سازی سریع بیلان عمومی محدوده‌های مطالعاتی کشور بوده است هر چند که برای برآوردهای دقیق‌تر، مدل‌سازی توزیعی توصیه می‌شود که در آن امکان درنظر گرفتن تبادلات آب بین منابع سطحی و زیرزمینی با درنظر گرفتن تغییرات گرادیان هیدرولیکی امکان‌پذیر است.

کلمات کلیدی: بیلان عمومی، بیلان هیدروکلیماتولوژی، بیلان زیرزمینی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۵/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱۱/۲۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Monthly Water Balance Modeling by Linking Hydro-Climatologic and Tank Groundwater Balance Models

*M. Moeini [1] and B. Zahraie[2]**

Abstract

Sustainable management of water resources in various basins depends on accurate estimation of water balance. Reviewing literature of water balance models reveals that most published works are focused on hydro-climatologic water balance models, which consider aquifers like tanks with one or two soil layers. These models use empirical equations to calculate the effects of groundwater on hydro-climatological water balance. In this study, we have tried to advance previous studies by linking previously developed hydro-climatological and groundwater balance models. In the developed model, the aquifers were modeled more accurately in water balance model by using the tank-model approach. Optimizaing the parameters of the joint water balance model is an important step for achieving proper water balance model performance. In order to assess the performance of the recommended model, hydro-climatological and groundwater water balance in Neyshabur and Rokh plains were modeled for a nine-year period. The results proved that the proposed approach can be used for modeling water balance of other basins in the country. Although distributed modeling is suggested which allows considering interactions between surface water and groundwater resources.

Keywords: Water Balance, Hydro-Climatologic Water Balance, Tank Groundwater Balance Optimization, Genetic Algorithm.

Received: August 16, 2017
Accepted: February 11, 2018

1- M.Sc. in Water Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, School of Civil Engineering, Department of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: bzahraie@ut.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

مطالعات مربوط به بیلان آبی ماهانه در کتاب "دستورالعمل‌ها و جداول برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل و بیلان آبی" ارائه شده توسط Thornthwaite and Mather (1957)، شاید از ابتدایی‌ترین مطالعات موجود در ارتباط با مدل‌های بیلان آبی باشد. سوابق تحقیقاتی در مورد مدل‌های بیلان ماهانه عمدتاً معطوف به مدل‌های بیلان هیدروکلیماتولوژی است که آبخوان را تنها به صورت یک‌لایه یا دولایه از خاک متخلخل در نظر می‌گیرد. در سال‌های بعد، Alley (1984) بررسی جامعی بر روی رویکردهای مختلف مدل‌سازی بیلان (بارش–رواناب) ماهانه انجام داد. همچنین، Rao and Al-Wagdany (1995)، و Mc Cabe and Markstorm (2007) مدل‌هایی را مبتنی بر رویکرد مورد استفاده در مدل تورن وایت ارائه کردند که در آن‌ها، علاوه بر تعیین میزان مشارکت برف در ماه‌های مختلف، اندرکنش رواناب با آب زیرزمینی نیز لحاظ گردیده است.

یکی دیگر از کلاس‌های عمده مدل‌سازی بارش–رواناب در مقیاس زمانی ماهانه، توسط Makhlouf and Michel (1994) در فرانسه به نام GR2M بنیاد گذاشته شد. در این مدل‌ها نیز تعادل رطوبتی خاک مدنظر قرار داشته، اما ساختار روابط اجزای مختلف بیلان آبی و همچنین روابط تعیین هر کدام به صورت کلی با آنچه تا به حال مطرح شده، متفاوت است. از دیگر رویکردها در مدل‌های بیلان ماهانه بارش–رواناب، مدل Nopex است که در ابتدا توسط Xu and Van Dewiele (1995) ارائه شد و در سال‌های ۱۹۹۶ و در نهایت ۲۰۰۷ تحت عنوان WASMOD به بلوغ خود رسید. این مدل دارای اجزای روناب سریع و کند (ناشی از آب زیرسطحی)، برف و تبخیر بوده و از ساختار کلی اجزای بیلان آبی پیروی می‌کند.

علاوه بر تحقیقات ذکر شده در فوق، ادبیات فنی در مدل‌سازی بیلان زیرزمینی نیز توسعه یافته است. از جمله مدل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، مدل تانک زیرزمینی است. این مدل برای اولین بار توسط Sugawara and Funiyuki (1956) جهت محاسبه رواناب سطحی، توسعه یافته است. همچنین محققانی نظیر Tingsanchali and Gautam (2005)، Kanoh and et al. (2000) و Chen and et al. (2003) از مدل تانک به منظور مقاصد مختلفی همچون پیش‌بینی سیلاب رودخانه، مدل‌سازی حوضه آبریز سد و تحلیل بارش–رواناب استفاده کردند. از شاخص‌ترین تحقیقات انجام شده در خصوص مدل‌های تانک زیرزمینی، تحقیق Kazumba and et al. (2008) است که برای مدل‌سازی آبخوان و محاسبه سطح ایستابی از آن بهره جستند. در این مدل آبخوان مورد نظر به صورت چند مخزن متصل به هم شبیه‌سازی شده است که با روش‌های عددی همچون کواسی–نیوتون پارامترهای مورد نظر و تعداد مخازن بهینه می‌شود.

از تحقیقات قبلی در زمینه تلفیق مدل‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی می‌توان به تحقیق Finch (1998) اشاره کرد که در آن با درنظر گرفتن یک مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی به کمک قانون بقای جرم، تأثیر مقدار پوشش گیاهی بر وضعیت منابع آب زیرزمینی سنجیده شده است. در این مدل، مقدار دبی جریان آب زیرزمینی با فرض اینکه تغذیه منابع آب سطحی از آب زیرزمینی صفر باشد برابر است با مجموع رطوبت اضافی خاک نسبت به ظرفیت رطوبتی خاک اشباع که جاری می‌شود و تغییرات میزان رطوبت خاک. در تحقیقی دیگر که توسط Kenedy and et al. (2003) ارائه شده، یک مدل بیلان رطوبت خاک برای سنجش تأثیر رطوبت خاک بر روی آب زیرزمینی به عنوان منبع آب مورد استفاده برای آبیاری مناطق کشاورزی در نظر گرفته شده است. در این مدل، مقدار دبی جریان آب زیرزمینی از نیمرخ خاک با در نظرگرفتن بارش، تبخیر و دما، مقادیر برداشت از آب زیرزمینی برای آبیاری، مقادیر نفوذ، رطوبت خاک و بدون در نظر گرفتن ذوب برف، محاسبه می‌شود. این مدل فاقد قابلیت محاسبه رواناب سطحی است. همچنین، در تحقیقی که توسط Yihdego and Khalil (2017) ارائه شده، اختصاص و تقسیم‌بندی جریان آب زیرزمینی با توجه به یک مدل مفهومی هیدرولوژیکی مورد ارزیابی قرار داده شده است. در این مدل یک حوضه فرضی که ورودی زیرزمینی از مرزهای آن وجود ندارد، برای محاسبه دبی جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. همچنین، معادلات مربوط به رواناب سطحی به طور مستقیم وارد مدل نشده و دبی جریان آب زیرزمینی به صورت درصدی از بارش در منطقه در نظر گرفته شده است.

در تحقیق حاضر، یک مدل جامع بیلان هیدروکلیماتولوژی به یک مدل بیلان زیرزمینی متصل شده است. در مدل‌های بیلان موجود عموماً فرض‌های ساده‌کننده‌ای برای هر یک از پارامترهای مؤثر بر اجزای بیلان در نظر گرفته می‌شود. آبخوان در این مدل‌ها عمدتاً به صورت خاک یک‌لایه و یا دولایه با ضخامت مشخصی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق برای توسعه این مدل‌ها و افزایش کارایی و دقت آن‌ها، اندرکنش میان آب زیرزمینی و آب سطحی با استفاده از مدل تانک زیرزمینی در نظر گرفته شده است که تا کنون انجام نشده است. بهینه کردن پارامترهای مدل بیلان آبی توسعه داده شده، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک انجام شده است. از طرفی با توجه به اتصال دو مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی و مدل تانک

زیرزمینی، پارامترهای هر دو مدل به طور همزمان بهینه شده‌اند. نتایج مدل به گونه‌ای است که تطابق هر دو متغیر سطح ایستابی آبخوان و رواناب خروجی از حوضه را با مقادیر مشاهداتی قابل سنجش است. در این تحقیق، نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده بر روی حوضه آبریز نیشابور که شامل دو محدوده مطالعاتی نیشابور و رخ است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل تانک و مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی به صورت همزمان بهینه شده است. تفاوت عمده مدل توسعه داده شده در این تحقیق نسبت به موارد معدود مدل‌های ارائه شده در تحقیقات قبلی، مدل‌سازی کامل هر دو بیلان هیدروکلیماتولوژی و زیرزمینی به صورت به هم پیوسته است. در مدل پیشنهادی، ذوب برف نیز درنظر گرفته می‌شود که در هیچ یک از مدل‌های فوق الذکر درنظر گرفته نشده است.

تحقیق انجام شده به لحاظ کاربردی نیز حائز اهمیت است. روش‌شناسی مدل‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز کشور در مقیاس ماهانه مستلزم صرف زمان و هزینه کارشناسی قابل ملاحظه‌ای است که یک علت آن ناپیوسته بودن فرآیند و مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی بیان هیدرولوکلیماتولوژی و بیلان زیرزمینی است. هدف این تحقیق، توسعه مدل بیلان عمومی است که بتواند مدل‌سازی بیلان هیدروکلیماتولوژی و زیرزمینی را به صورت همزمان انجام دهد. اگر چه چنین مدلی قطعاً جایگزین بررسی‌های دقیق کارشناسی در مورد اجزای بیلان هیدروکلیماتولوژی و زیرزمینی در فرآیند جاری مدل‌سازی بیلان ماهانه در کشور نمی‌شود ولی می‌تواند برای تخمین‌های سریع کارشناسی مورد استفاده قرار گیرد و نیز می‌تواند مبنایی برای تحلیل نتایج بررسی‌های میدانی و کارشناسی باشد. در ادامه مقاله در بخش ۲، مفاهیم و فرمولاسیون روش مورد استفاده تشریح شده است. منطقه مورد مطالعه در این مقاله در بخش ۳ معرفی شده و سپس در بخش ۴ نتایج حاصل از کاربرد روش پیشنهادی در این منطقه ارائه و به بحث گذاشته شده است. نهایتاً در بخش ۵ جمع‌بندی و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه شده است.

۲- روش انجام کار

ساختار مدل پیشنهادی در این تحقیق به صورت ترکیبی از مدل‌های ارائه شده توسط Rao & Al-Wagdany (1995) برای بیلان هیدروکلیماتولوژی و Kazumba and et al. (2008) برای بیلان آب زیرزمینی در نظر گرفته شده که پارامترهای این دو مدل به طور همزمان بهینه می‌شوند.

در مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی ارائه شده توسط Rao & Al-Wagdany (1995)، اثر منابع آب زیرزمینی در رواناب‌های سطحی، به صورت یک جریان پایه مشخص در ماه‌های مختلف محاسبه می‌شود. برای این منظور یک حجم اولیه برای رطوبت خاک در نظر گرفته می‌شود که به صورت بازگشتی در بازه‌های زمانی متوالی به‌روزرسانی می‌شود. در این تحقیق، به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر آب‌های زیرزمینی و تبادلات آن با منابع آب سطحی، سعی شده است اثر آب زیرزمینی توسط مدل بیلان تانک زیرزمینی مدل‌سازی شود.

Rao & Al-Wagdany (1995)، شامل متغیرهای هیدرولوژیکی بارش، ذوب برف، تبخیر، رطوبت خاک، حجم آب زیرزمینی، رواناب مستقیم و جریان پایه در مقیاس ماهانه است. در این مدل، میزان بارش حوضه در هر ماه بر اساس میانگین دمای ماهانه ($T(t)$)، به دو بخش باران (RA) و برف (SN) مطابق روابط ارائه شده در تحقیق Rao & Al-Wagdany (1995) تقسیم‌بندی و محاسبه می‌شوند. در اینجا مستقل از اینکه دمای منطقه چقدر است، فرض می‌شود که درصدی از بارش حوضه، به صورت باران خواهد بود.

پس از محاسبات مربوط به مقدار بارش، مقدار رواناب مستقیم، $Q_s(t)$، از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_s(t) = SRC(t).RA(t) \qquad (۱)$$

که در این رابطه $SRC(t)$ ضریب رواناب مستقیم در ماه tام است. این پارامتر با توجه به روابط ارائه شده توسط رائو و الوقدانی محاسبه می‌شود.

ذوب برف و رواناب سطحی ناشی از بارش، از جمله منابع تأمین تبخیر هستند. در صورتی که این منابع برای تأمین تبخیر کافی نباشند، بخشی از رطوبت خاک در ماه گذشته برای تأمین آن استفاده خواهد شد. مقدار حدی تبخیر، "تبخیر و تعرق پتانسیل" درنظر گرفته می‌شود که روش‌های مختلفی برای محاسبه آن وجود دارد. از بین روابط موجود، معمولاً با توجه به نوع اطلاعات در دسترس مانند سرعت باد، تابش خورشید و غیره یکی از روابط انتخاب می‌شود. در این تحقیق به منظور محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از رابطه ارائه شده توسط Xiang and et al. (1997) استفاده شده است:

$$ETP(t) = c^* ET(t)^* \tanh\left[P(t)/ET(t)\right] \qquad (۲)$$

که در این رابطه $ETP(t)$ مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل، $ET(t)$، مقدار تبخیر ماهانه از سطح تشت، c ضریبی جهت در نظر گرفتن تأثیر تغییر مقیاس زمانی و tanh، هم تانژانت هایپر بولیک نسبت بارش به تبخیر است.

در ادامه پس از تامین میزان تبخیر، آب باقی مانده در صورت وجود، صرف افزایش رطوبت خاک می‌شود که این رطوبت خاک به مقدار حداکثر خود ((SMAX(mm)) محدود می‌شود. سپس بخشی از آب باقی مانده‌ی WS(t)، پس از تامین رطوبت مورد نیاز خاک، تبدیل به رواناب سطحی شده که توسط رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$Q_0(t) = K_1 WS(t) \qquad (۳)$$

که در این رابطه K_1 ضریبی بدون بعد است. در ادامه بخش باقی مانده از $WS(t)$ به مخزن آب زیرزمینی نفوذ می‌کند. مقدار آب نفوذ کرده ($B_i(t)$) به آب زیرزمینی مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$B_i(t) = (1-K_1)\, WS(t) \qquad (۴)$$

در این مدل فرض بر این است که جریان پایه، از مخزن آب زیرزمینی، رواناب سطحی را تغذیه می‌کند. جریان پایه در هر ماه (Q_b) از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$Q_b(t) = K_2 \sum_{1}^{N} X_i(t-1) \qquad (۵)$$

در این رابطه، $\sum_{1}^{N} X_i(t-1)$ مقدار مجموع حجم آب قابل دسترس در مخازن آب زیرزمینی در ماه گذشته است و K_2 پارامتر رابطه است.

در مدل تانک زیرزمینی که در این تحقیق به مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی متصل شده است، آبخوان مورد مطالعه به تعدادی مخزن (i) تقسیم‌بندی می‌شود که این تقسیم‌بندی متأثر از شرایط فیزیکی و زمین‌شناسی آبخوان است. در این مدل، مخازن با یکدیگر تبادل جریان عمودی و افقی دارند. بدین ترتیب اگر تانک‌ها با یکدیگر ارتباطی نداشته باشند، جریانی نیز بین آنها منتقل نمی‌شود، در نتیجه ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بین دو مخزن i و j برابر با صفر خواهد بود ($k_{i,j}=0$). همچنین بدیهی است که ضریب هدایت هیدرولیکی $k_{i,i}$ همواره برابر صفر خواهد بود.

اگر معادله بیلان آبی در منطقه، با در دست داشتن اطلاعات بارش، دبی تخلیه مخازن، جریان ورودی از رودخانه یا مخزن سطحی آب و سطح ایستابی آبخوان‌ها، گسترش داده شود، معادلات مدل تانک به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$X_i(t+\Delta t) = \left(I_{i,j} + x_{i,j} + B_i(t) - Q_i(t) + q_i\right)\Delta t + X_i(t) \quad (i \neq j) \qquad (۶)$$

$$I_{i,j}(t) = \sum_{J=1}^{l} k_{i,j}\left(H_{i,j}(t) - \frac{X_i(t)}{\eta_i A_i}\right) \qquad (۷)$$

$$x_{i,j}(t) = \sum_{J=1}^{M-l} k_{i,j}\left(\frac{X_j(t)}{\eta_j A_j} - \frac{X_i(t)}{\eta_i A_i}\right) \qquad (۸)$$

که در این روابط $X_i(t+\Delta t)$ ، میزان حجم ذخیره در تانک i (m^3) در زمان t+Δt که Δt فواصل زمانی بین گام‌های زمانی و t گام زمانی و $X_i(t)$، میزان حجم ذخیره در تانک i در زمان t (m^3) است. سایر متغیرهای مورد استفاده در این روابط به شرح زیر هستند:

I_{ij}: میزان جریان ورودی به تانک i از رودخانه یا دریا (j) در زمان t (m^3/month)؛

$x_{i,j}(t)$: میزان جریان ورودی از تانک j به تانک i در زمان t (m^3/month)؛

$B_i(t)$: مقدار آب نفوذ کرده به تانک i در زمان t (m^3/month)؛

$Q_i(t)$: میزان دبی تخلیه از تانک i در زمان t (m^3/month)؛

q_i: میزان جریان ورودی از آبخوان‌های مجاور (آبخوان‌های خارج از حوضه مورد مطالعه) به تانک i در زمان t (m^3/month)؛

$B_{i,j}$: مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی از تانک j به تانک i (m^2/month)؛

η_i: ضریب تخلخل خاک در تانک i؛

A_i: سطح مقطع مخزن i (m^2)؛

l: تعداد منابع آب سطحی و یا رودخانه‌هایی که آبخوان از آنها تغذیه می‌کند؛

M: تعداد کل تانک‌های موجود در مدل

بدین ترتیب، تراز هیدرولیکی محاسبه شده $h_i(t|\theta)$ در تانک i در زمان t با بردار پارامترهای θ به صورت زیر تعریف می‌شود که در این رابطه $X_i(t|\theta)$ حجم ذخیره مخزن در تانک i در زمان t با بردار پارامترهای θ است:

$$h_i(t|\theta) = \frac{X_i(t|\theta)}{\eta_i A_i} \qquad (۹)$$

همانطور که پیش‌تر گفته شد جریان تغذیه شده از آب زیرزمینی به رواناب سطحی($Q_b(t)$) از رابطه ۵ به دست می‌آید که در این رابطه مقدار $\sum_1^N X_i(t-1)$ از رابطه بازگشتی (۱۰) قابل محاسبه است:

$$\sum_{i=1}^{N} X_i(t+\Delta t) = \sum_{i=1}^{N}\left\{\left(I_{i,j} + x_{i,j} + B_i(t) - Q_i(t) + q_i\right)\Delta t + X_i(t)\right\} \quad (i \neq j) \qquad (۱۰)$$

مقادیر اولیه در این معادله بازگشتی از طریق مقادیر سطح ایستابی مشاهداتی در تانک‌ها مطابق رابطه ۹ به دست می‌آید. بنابراین مقدار کل رواناب، QE(t)، برابر است با:

$$QE(t) = Q_s(t) + Q_0(t) + Q_b(t) \qquad (۱۱)$$

در ادامه، الگوریتم دقیق مدل تلفیقی پیشنهادی برای محاسبه اجزای بیلان عمومی به صورت گام به گام تشریح شده و به صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است، در این مرحله گام‌های ارائه شده در مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی رائو و الوقدانی مورد استفاده قرار گرفته است با این تفاوت که مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. با توجه به داده‌های در دسترس برای محاسبه مقدار تبخیر پتانسیل از رابطه‌ای متفاوت استفاده شده است، و روابط جدید ارائه شده برای اتصال دو مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی و مدل بیلان تانک زیر زمینی با گامهای ارائه شده در زیر وارد مراحل انتهایی الگوریتم مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی رائو و الوقدانی شده و این مدل را به مدل بیلان تانک زیرزمینی متصل می‌کند:

۱- مقدار حجم مخزن تانک زیرزمینی در هر ماه مطابق رابطه (۱۴) و مقدار تراز آب زیر زمینی در هر تانک (h_i) از طریق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

۲- مقدار $Q_b(t)$ به عنوان دبی پایه که از آب زیر زمینی به رواناب سطحی اضافه می‌شود، با توجه به مقدار ضریب K_2 و حجم ذخیره کل مخازن زیرزمینی$\sum_1^N X_i(t-1)$ در ماه قبل محاسبه می‌شود. نحوه محاسبه $Q_b(t)$ در رابطه (۹) نشان داده شده است.

۳- مقدار کل رواناب QE در هر ماه با جمع مقادیر Q_s، Q_0 و Q_b به دست می‌آید.

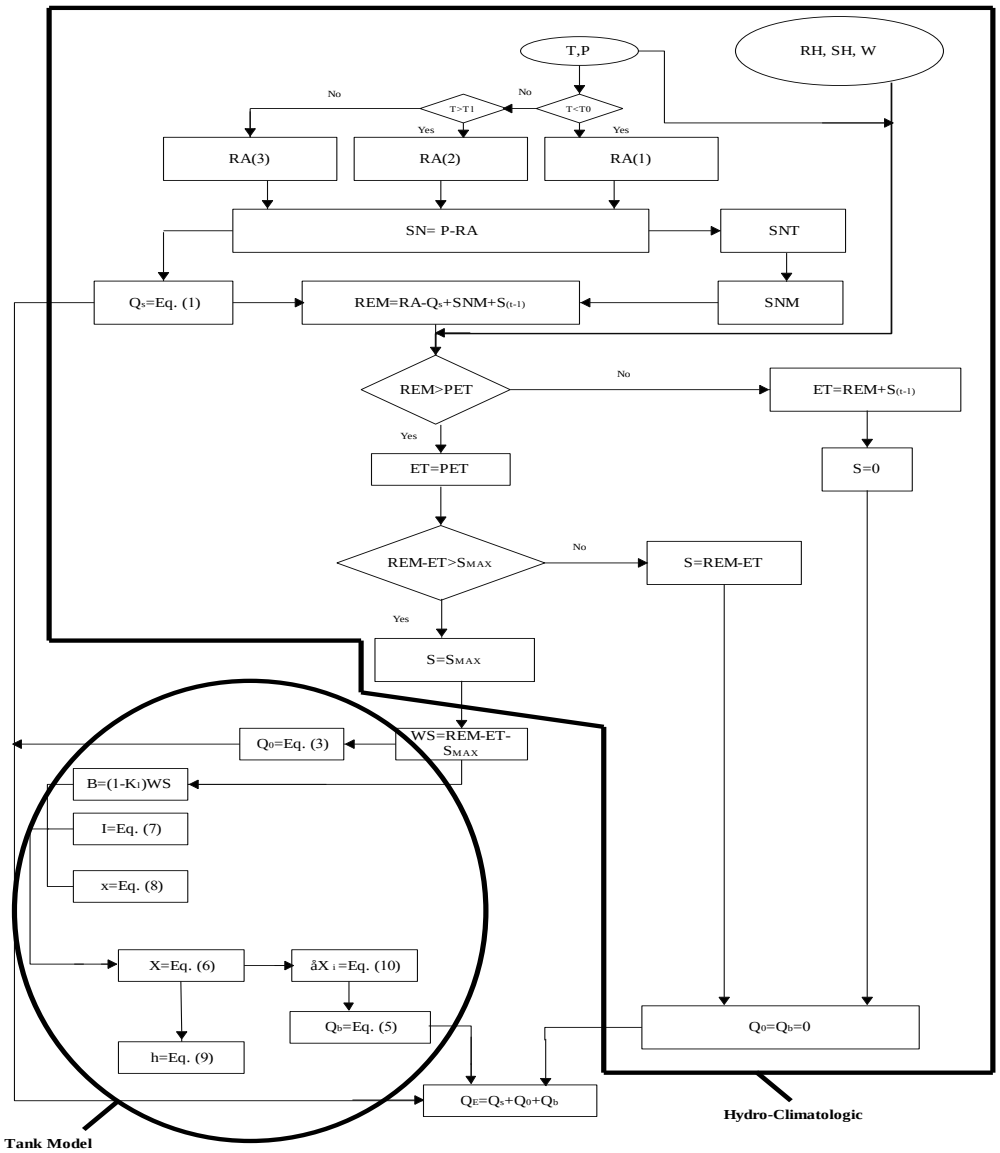

Fig. 1- Proposed combined hydro-climatological and groundwater tank models

شکل ۱- ساختار ترکیبی مدل‌های بیلان هیدروکلیماتولوژی و تانک زیرزمینی

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، در این تحقیق به منظور توسعه مدل بیلان عمومی پیشنهادی، سعی شده پارامترهای دو بخش بیلان هیدروکلیماتولوژی و زیرزمینی به طور همزمان بهینه شوند. این پارامترها، همان متغیرهای تصمیم مسأله هستند که در انتهای الگوریتم بهینه‌سازی، انتظار می‌رود مقادیر بهینه آنها به دست آیند. متغیرهای تصمیم مسأله در مدل پیشنهادی عبارتند از:

$T_0(t)$: دمایی که در آن میزان برف در بارش ماهانه مقدار حداکثر خود را دارد ($^{\circ}C$)، (استفاده شده در مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی رائو و الوقدانی)

$T_1(t)$: دمای آستانه که در هر دمایی مساوی یا بیشتر از آن، کل بارش ماهانه به صورت باران خواهد بود ($^{\circ}C$)، (استفاده شده در مدل بیلان هیدروکیماتولوژی رائو و الوقدانی)

α: ضریب حداقل بارش، (استفاده شده در مدل بیلان هیدروکیماتولوژی رائو و الوقدانی)

$SRC(t)$: ضریب رواناب مستقیم، (استفاده شده در مدل بیلان هیدروکیماتولوژی رائو و الوقدانی)

$\beta = DF(t)\times T(t)\times Days(t)$: که بیانگر (تعداد روزهای ماه × میانگین دمای ماهانه × نرخ ذوب برف) است (mm)، (استفاده شده در مدل بیلان هیدروکیماتولوژی رائو و الوقدانی)

c: ضریبی جهت در نظر گرفتن تأثیر تغییر مقیاس زمانی،

SMax: رطوبت خاک اشباع (mm)،

K_1: ضریب تبدیل رطوبت اضافی به روان آب سطحی (استفاده شده در مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی رائو و الوقدانی)،

K_2: ضریب دبی پایه،

$K_{i,j}$: ضریب هدایت هیدرولیکی ($m^2/month$)،

$X_i(1)$: حجم ذخیره اولیه مخازن زیرزمینی (m^3) و

e: مقدار تخلخل خاک.

برای آموزش مدل پیشنهادی، به دلیل تعدد پارامترها، غیرخطی بودن روابط مدل و همچنین نیاز به بهینه‌سازی همزمان پارامترهای مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی و تانک زیرزمینی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. تعیین تابع هدف در مسأله مورد نظر به عوامل مختلفی از جمله هدف از بهینه‌سازی وابسته است. در این تحقیق، به منظور ارزیابی نیکویی برازش، نتایج مدل برای بیلان هیدروکلیماتولوژی از شاخص تشابه نش-ساتکلیف ($N.S^1$) استفاده شده است. این شاخص بازه تغییراتی از $-\infty$ تا ۱ دارد. هر چه این شاخص به سمت عدد یک نزدیکتر شود، مدل از دقت شبیه‌سازی بالاتری برخوردار است. در حالی که مقدار منفی برای این شاخص زمانی رخ می‌دهد که مقادیر r حاصل از مدل شبیه‌سازی در مقایسه با مقدار میانگین مقادیر مشاهداتی ضعیف‌تر است. همچنین به منظور ارزیابی نیکویی برازش مدل‌های بیلان آب زیرزمینی، در این تحقیق از شاخص ارزیابی خطا یا جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. با استفاده از این شاخص در مدل‌های بیلان آب زیرزمینی، مدلی مناسب‌تر خواهد بود که دارای کمترین RMSE باشد. در مدل پیشنهادی، با توجه به بهینه‌سازی همزمان پارامترهای بیلان آب سطحی و زیرزمینی، تابع هدف شامل ترکیبی از شاخص‌های ارزیابی تشابه و خطا خواهد بود.

$$\text{Objective Function} = \text{Min}\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{RMSE_i}{\bar{h}_i} - N.S_r\right) \quad (۱۲)$$

که در این رابطه، $\bar{h}_i$ برابر میانگین سطح ایستابی مشاهداتی در تانک iام است. به منظور در نظرگرفتن شاخص خطای RMSE به صورت درصدی، مقادیر این شاخص در یک تانک به مقدار متوسط سطح ایستابی آن تانک، تقسیم شده است.

۳- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کویر مرکزی با مساحت ۲۲۶۵۱۸ کیلومتر مربع، بزرگترین حوضه آبریز در سطح کشور است که بخش وسیعی از مناطق مرکزی و شرقی ایران را تشکیل می‌دهد. حوضه آبریز نیشابور در دل کویر مرکزی، شامل دو محدوده مطالعاتی نیشابور و دشت است. موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. داده‌های مورد استفاده در مدل به داده‌های مربوط به بارش، تبخیر، دما، رواناب و داده‌های آب زیرزمینی تقسیم‌بندی می‌شود. در هر یک از موارد از ایستگاه‌های موجود و در دسترس استفاده شده و برای به دست آوردن مقدار نهایی برای هر ماه، از روش میانگین‌گیری تیسن از ایستگاه‌های مربوطه استفاده شده است. از این رو برای به دست آوردن مقدار بارش از ۸ ایستگاه باران‌سنجی روح‌آباد، فریمان، باغ ارایه، صنوبر، نیشابور، حسین آباد، عیش‌آباد و ناری استفاده شده است. به همین ترتیب برای داده‌های تبخیر از ۶ ایستگاه تبخیرسنجی صنوبر، آبشار، اولنگ اسدی، فرمیان فرهادگر، ملک‌آباد و چهارباغ، برای داده‌های مربوط به دما از ۵ ایستگاه سنجش دما به نام‌های چهارباغ، آبشار، صنوبر، ملک آباد و اولنگ اسدی، و در نهایت برای مقادیر رواناب از ایستگاه هیدرومتری حسین‌آباد جنگل که در محل خروج از حوضه قرار دارد بهره گرفته شده است. برای داده‌های سطح ایستابی آب در دشت رخ از داده‌های ۴۸ عدد چاه مشاهداتی و در دشت رخ از ۲۸ عدد چاه مشاهداتی استفاده شده است.

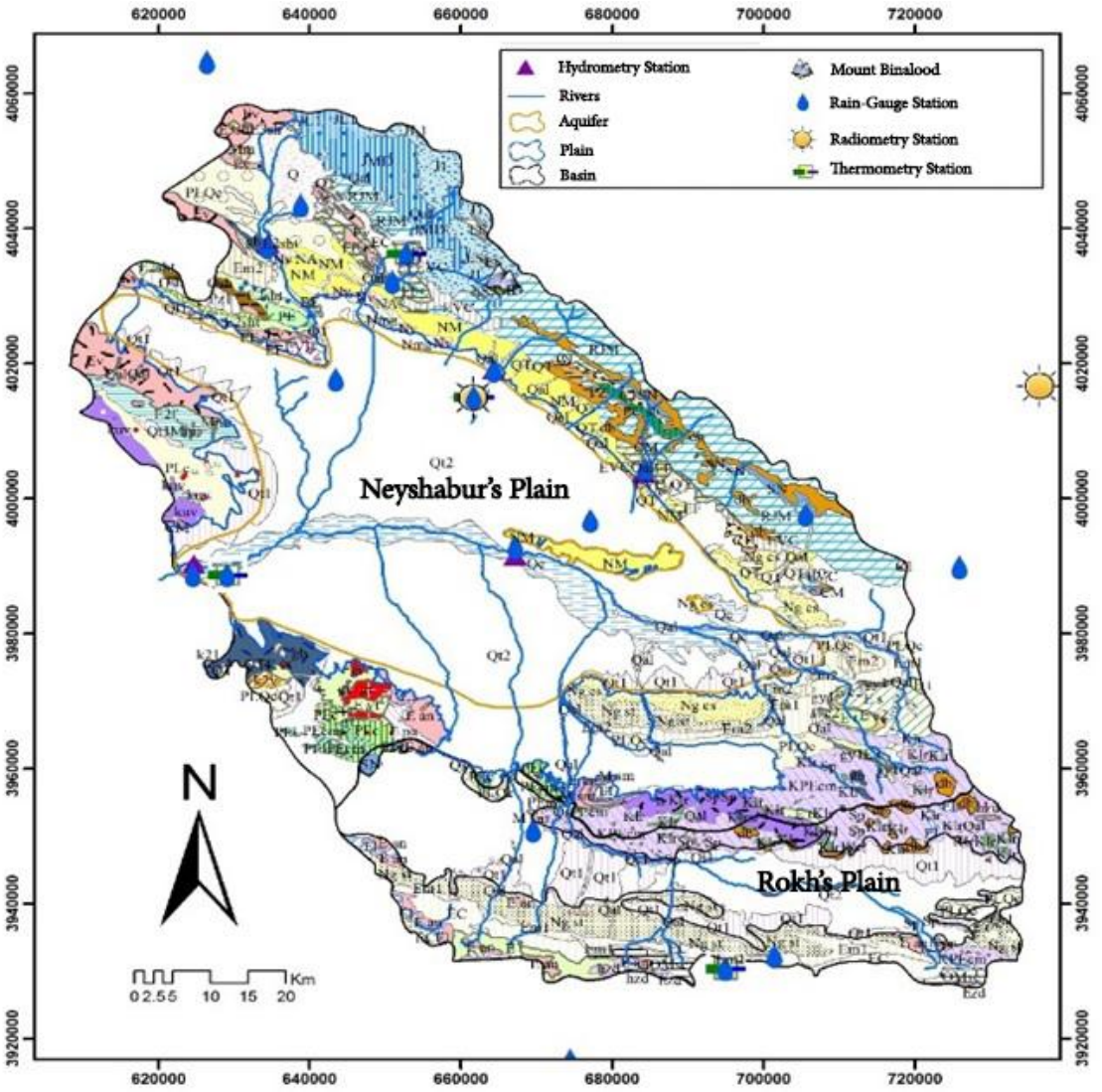

Fig. 2- Location map of Neyshabur Basin

شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز نیشابور

۴- نتایج

جهت ارزیابی کارایی مدل، نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی در حوضه آبریز نیشابور مورد بررسی قرار گرفته است. در حوضه مورد مطالعه، ۹ سال سابقه تاریخی از سال‌های ۸۲-۸۱ تا ۹۰-۸۹ برای داده‌های بارش، تبخیر، دما، سطح ایستابی آب زیرزمینی و دبی تخلیه از آب زیرزمینی در دسترس است. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های ۷ سال اول (از سال ۸۲-۸۱ تا ۸۸-۸۷) آموزش داده شده و داده‌های ۲ سال باقیمانده (از سال ۸۹-۸۸ تا ۹۰-۸۹) به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. تمامی مدل‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB 2013 برنامه‌نویسی شده‌اند. همچنین جهت حل مسأله بهینه‌سازی، از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

۴-۱- آموزش مدل پیشنهادی

برای مدل پیشنهادی، ۱۴ متغیر تصمیم در نظر گرفته شده (به دلیل وجود دو مخزن در مدل پیشنهادی که پارامتر $X_i(1)$ که مربوط به حجم مخازن است به صورت $X_1(1)$ و $X_2(1)$ تعریف شده است.) که ۱۰ متغیر اول پارامترهای مربوط به مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی و ۴ متغیر آخر پارامترهای مربوط به مدل بیلان تانک زیرزمینی هستند.

برای بهینه‌سازی مدل توسط الگوریتم ژنتیک می‌بایست برای هر یک از متغیرهای تصمیم مسأله، بازه‌ای در نظر گرفته شود که انتخاب‌ها در روند بهینه‌سازی در بازه موردنظر صورت گیرد. بازه‌های انتخابی با درنظر گرفتن بازه‌ی تغییرات داده‌های موجود یا پیشنهادات تحقیقات پیشین و یا سعی و خطا انتخاب شده‌اند. به عنوان مثال، مقادیر حداقل

و حداکثر بازه انتخابی برای حجم اولیه مخازن زیرزمینی با توجه به مقادیرحداقل و حداکثر سطح ایستابی مشاهداتی و ضریب تخلخل خاک (e) استحصال شده است. بازه‌های منتخب برای کلیه پارامترها در جدول ۱ نشان داده شده است.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک، با تحلیل حساسیت بر روی عملکرد الگوریتم به دست آمده‌اند. بدین ترتیب در این تحقیق الگوریتم ژنتیک با نرخ تزویج ۰/۴ و تعداد جمعیت ۲۰۰ در هر نسل و حداکثر تعداد نسل ۲۰۰۰ استفاده شده است. مقدار تابع هدف در انتها ۰/۸۶۷ حاصل شده است. در شکل ۳ روند همگرایی تابع هدف در طی نسل‌های متوالی ارائه شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که الگوریتم پس از تعداد ۲۰۰ نسل همگرا شده است.

در ادامه نتایج حاصل از آموزش مدل پیشنهادی با پارامترهای ورودی مشخص شده برای سال‌های ۸۲-۸۱ تا ۸۸-۸۷ در اشکال ۴ الی ۷ ارئه شده است. مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسأله پس از اتمام روند بهینه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. در اشکال فوق نحوه عملکرد مدل در دوره آموزش به نحوی است که در شکل ۴ و ۵ کیفیت تطابق دو مقدار محاسباتی و مشاهداتی در تخمین رواناب نشان داده شده است که مدل با توجه به مقدار ۰/۸۶۷ برای شاخص نش-ساتکلیف و همینطور ضریب همبستگی ۰/۸۶ عملکرد مطلوبی ارائه کرده است.

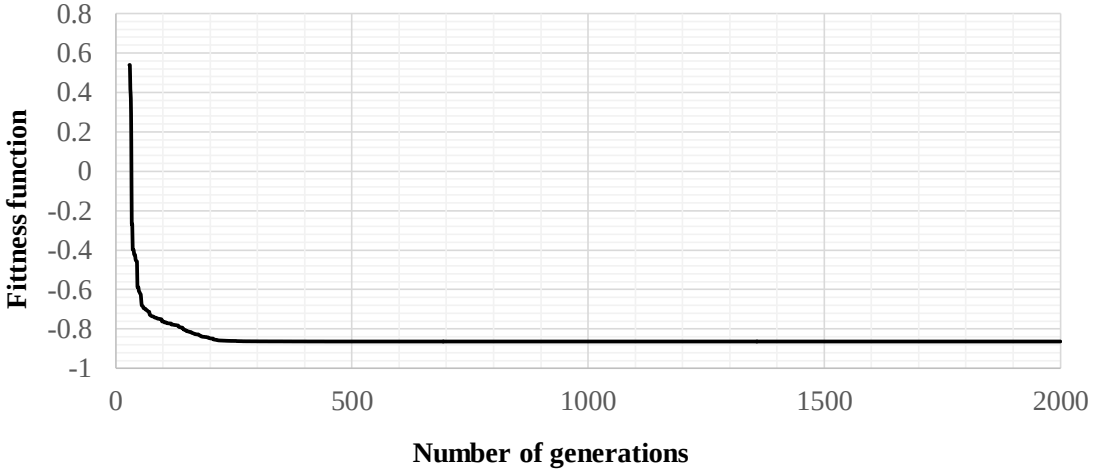

Fig. 3- Convergance of the optimization model

شکل ۳- همگرایی مدل بهینه‌سازی

Table 1- Selected intervals and optimal values for parameters

جدول ۱- بازه انتخابی و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسأله

Parameters	Intervals	Optimum
$T_0(t)$	[-2,10]	-1.37
$T_1(t)$	[1,10]	0
α	[0,1]	$4.6\times10^{(-5)}$
SRC(t)	[0,1]	0.0021
β	[0,1]	0.3248
S(t)	[0,500]	A set of numbers between 0 to 32.76
c	[0.1,4]	1.6656
SMAX	[0,500]	32.7621
K_1	[0,1]	0.0663
K_2	[0,1]	$3.82\times10^{(-13)}$
$K_{i,j}$	[1800,150000]	1800
$X_i(1)$	This parameter is selected by considering the minumum level of hydrulic head of each tank.	This parameter is selected by considering the minumum level of hydrulic head of each tank.
e	This parameter is selected between 0 to 0.5 by considering the soil characteristics of each zone	0.1995

همینطور در شکل‌های ۶ و ۷ عملکرد مدل در بحث محاسبات مرتبط با سطح ایستابی ارائه شده است که مدل با مقادیر خطای به ترتیب برای دشت‌های نیشابور و رخ ۰/۰۰۰۵۲ و ۰/۰۰۰۶۹ عملکرد قابل مطلوبی داشته است. عدم تطابق نقطه به نقطه به عواملی همچون میزان دسترسی به داده‌های متنوع همچون مقادیر برداشت ماهانه به تفکیک هر ماه در دوره هفت ساله آموزش بستگی دارد که در این تحقیق صرفا داده‌های مربوط به یک سال در مورد مقادیر برداشت در دسترس بوده است که برای تبدیل این مقادیر به مقادیر ماهانه از نسبت مقادیر مصرف کشاورزی، شرب و صنعت استفاده شده است که خود می‌تواند بر دقت مدل تأثیرگذار باشد. در ادامه نتایج مرحله اعتبارسنجی توضیح داده شده است.

۴-۲- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل پیشنهادی برای دو سال پایانی سال‌های ۸۲-۸۱ تا ۹۰-۸۹ (از سال ۸۹-۸۸ تا ۹۰-۸۹) انجام گرفته است. بدین منظور پارامترهای بهینه‌ی حاصل شده از مدل در مرحله آموزش، به مدل تخصیص داده شده و مقادیر رواناب سطحی و همچنین سطح ایستابی آب زیرزمینی در دو آبخوان دشت‌های نیشابور و رخ در این دو سال اعتبارسنجی، توسط مدل بهینه محاسبه شده است. شکل ۳ مقایسه بین رواناب سطحی محاسباتی توسط مدل بهینه و مقادیر مشاهداتی رواناب سطحی را در دوره ۲ ساله‌ی اعتبارسنجی نشان می‌دهد. همچنین به منظور شفاف‌سازی مقایسه‌ی بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی رواناب سطحی، میزان همبستگی این مقادیر در شکل ۴ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۸ و شکل ۹، مدل پیشنهادی بهینه شده عملکرد مناسبی در دوره ۲ ساله اعتبارسنجی از خود نشان داده است به طوری که میزان همبستگی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی رواناب سطحی حدود ۹۳٪ شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنیم، رواناب سطحی در نقاط پیک، بیش برآورد شده است. علت چنین تفاوت‌هایی می‌تواند برداشت‌هایی از آب سطحی باشد که در مدل پیشنهادی در نظر گرفته نشده‌اند ولی در عین حال تأثیرگذار هستند.

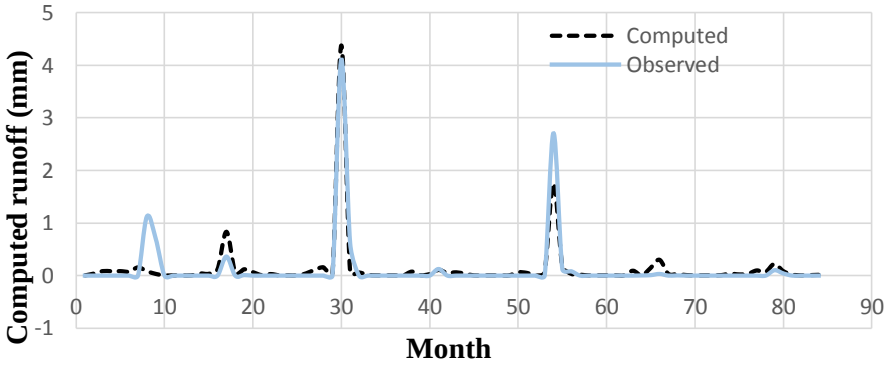

Fig. 4- Comparison between computed and observed runoff during calibration period

شکل ۴- مقایسه رواناب سطحی محاسباتی و مشاهداتی در دوره‌ی آموزش

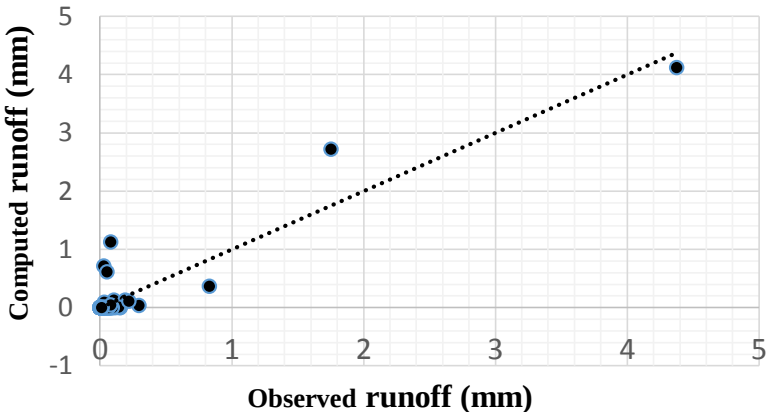

Fig. 5- Correlation between computed and observed runoff during calibration period

شکل ۵- همبستگی رواناب سطحی محاسباتی و مشاهداتی در دوره‌ی آموزش

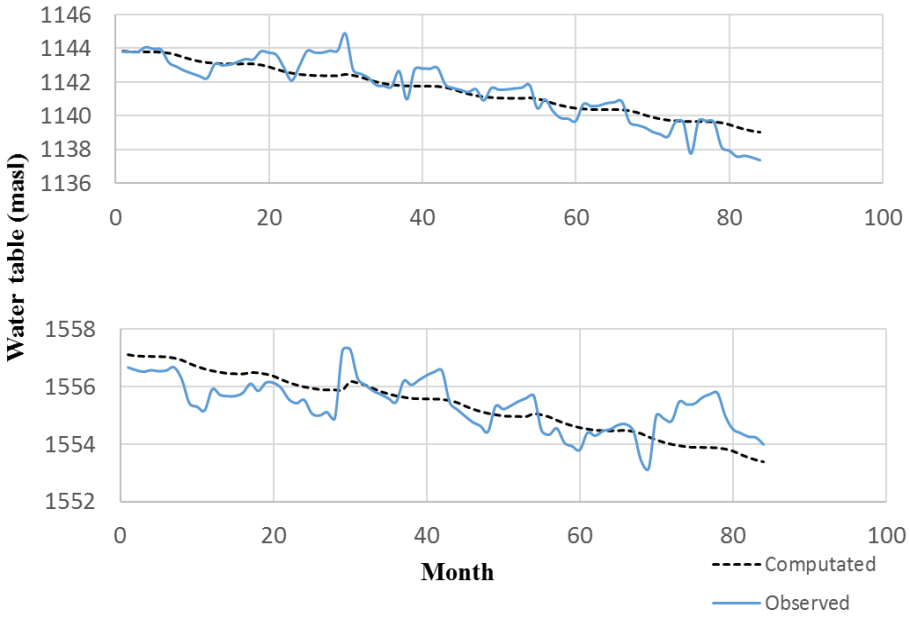

Fig. 6- Comparison between computed and observed aquifer water table during calibration

شکل ۶- مقایسه سطح ایستابی محاسباتی و مشاهداتی در در دشت نیشابور و رخ در دوره‌ی آموزش

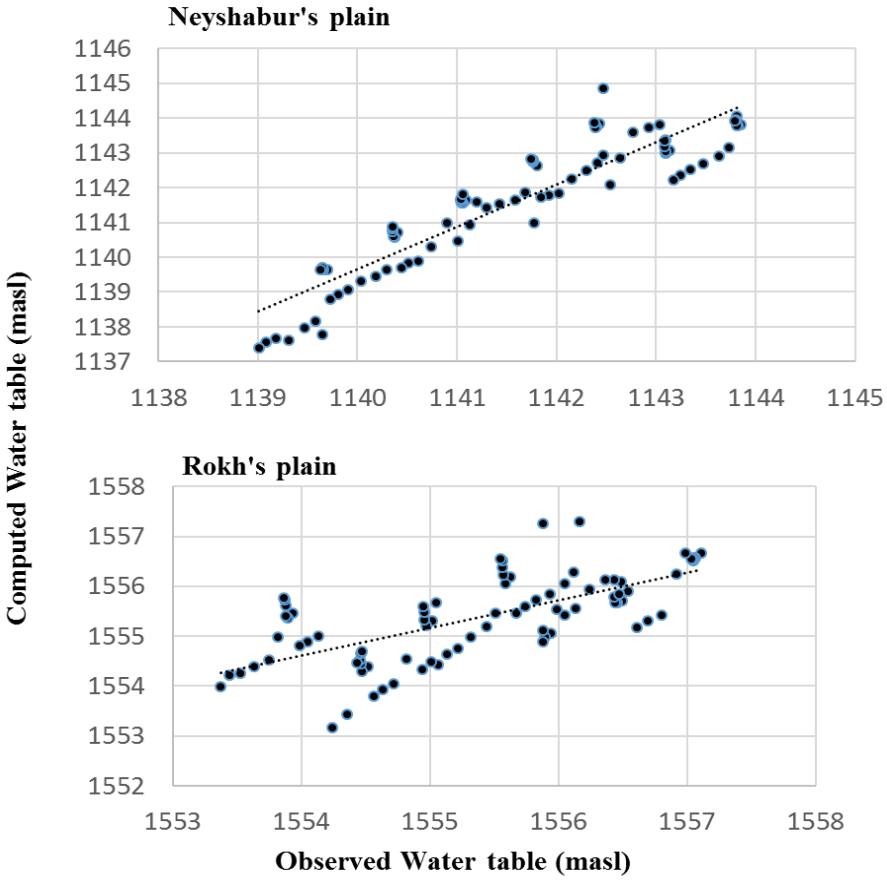

Fig. 7- Correlation between computed and observed aquifer water table during calibration

شکل ۷- همبستگی سطح ایستابی محاسباتی و مشاهداتی در دشت نیشابور و رخ در دوره‌ی آموزش

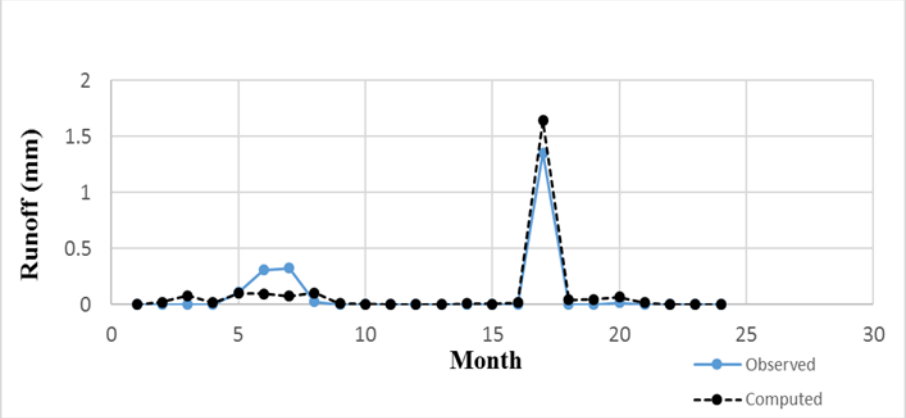

Fig. 8- Comparison between computed and observed runoff during validation period

شکل ۸- مقایسه رواناب سطحی محاسباتی و مشاهداتی در دوره‌ی اعتبارسنجی

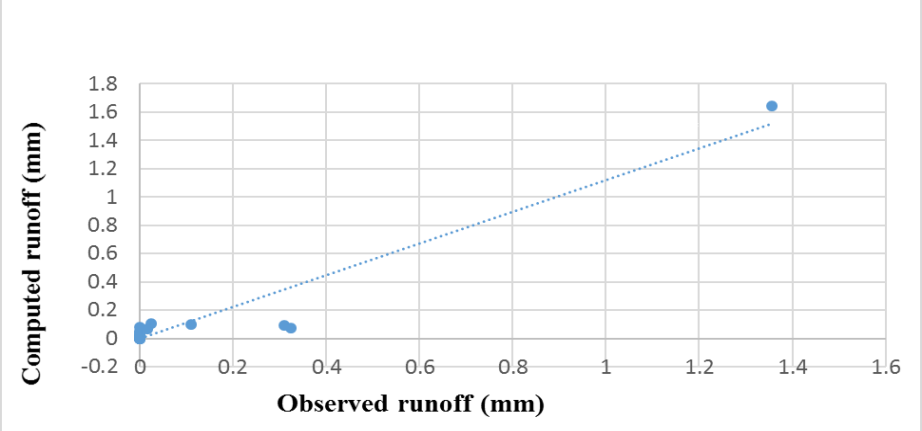

Fig. 9- Correlation between computed and observed runoff during validation period

شکل ۹- همبستگی رواناب سطحی محاسباتی و مشاهداتی در دوره‌ی اعتبارسنجی

در ادامه عملکرد مدل پیشنهادی برای محاسبه مقادیر سطح ایستابی آبخوان دشت نیشابور و دشت رخ در دوره‌ی دو ساله‌ی اعتبارسنجی (از سال ۸۹-۸۸ تا ۹۰-۸۹) ارائه شده است. بدین منظور شکل ۱۰ مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی سطح ایستابی آب زیرزمینی را در دشت نیشابور و رخ و همچنین شکل ۱۱ همبستگی بین این مقادیر را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنیم، مدل پیشنهادی، در مدل‌سازی روند تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی عملکرد نسبتاً مناسبی دارد. میزان همبستگی (ضریب همبستگی) در شکل ۱۱ برای دشت نیشابور و دشت رخ به ترتیب برابر ۰/۷۱ و ۰/۵۴ هستند. مقادیر غیردقیق دبی تخلیه از آبخوان‌ها تأثیر خود را در عملکرد مدل می‌گذارد. به طوری که در برخی ماه‌ها مقادیر محاسباتی و مشاهداتی تفاوت نسبتاً زیادی با یکدیگر دارند. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، مقادیر دبی تخلیه از آبخوان در سال ۱۳۸۸ به نسبت نیازهای برداشت ماهانه به داده‌های ماهانه تبدیل شده‌اند و این مقادیر دبی‌های تخلیه برای سال‌های مختلف ثابت درنظر گرفته شده است که می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر خطای مدل باشد.

۵- جمع‌بندی نتایج

در این تحقیق نتایج حاصل از توسعه مدل بیلان آبی ماهانه با اتصال مدل‌های هیدروکلیماتولوژی به مدل‌های بیلان آب زیرزمینی در حوضه آبریز نیشابور ارائه شده است. در همین زمینه فرمولاسیون پیشنهادی ناشی از اتصال مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی رائو و الوقدانی و مدل تانک بیلان زیرزمینی به طور تشریح شده است. ارزیابی نتایج در دوره آموزش مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که میزان همبستگی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی رواناب سطحی حدودا ۸۷٪ بوده است. همچنین همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح ایستابی آب زیرزمینی در دشت نیشابور و رخ حدوداً برابر با ۸۳٪ و ۵۵٪ بوده است. ارزیابی نتایج در دوره اعتبارسنجی مدل نیز نشان از عملکرد مناسب آن دارد.

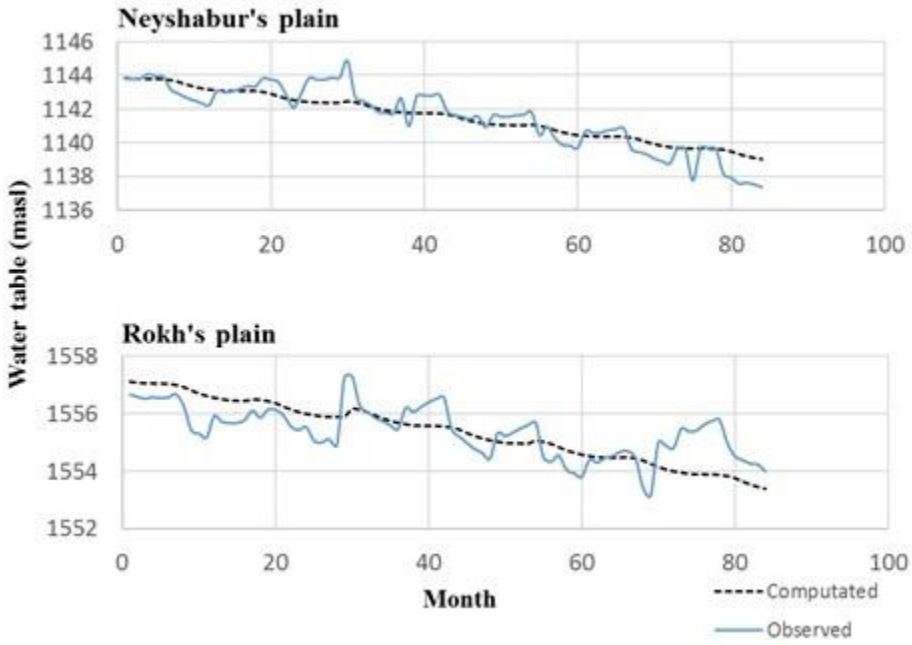

Fig. 10- Comparison between computed and observed aquifer water table during validation

شکل ۱۰- مقایسه سطح ایستابی محاسباتی و مشاهداتی در در دشت نیشابور و رخ در دوره‌ی اعتبارسنجی

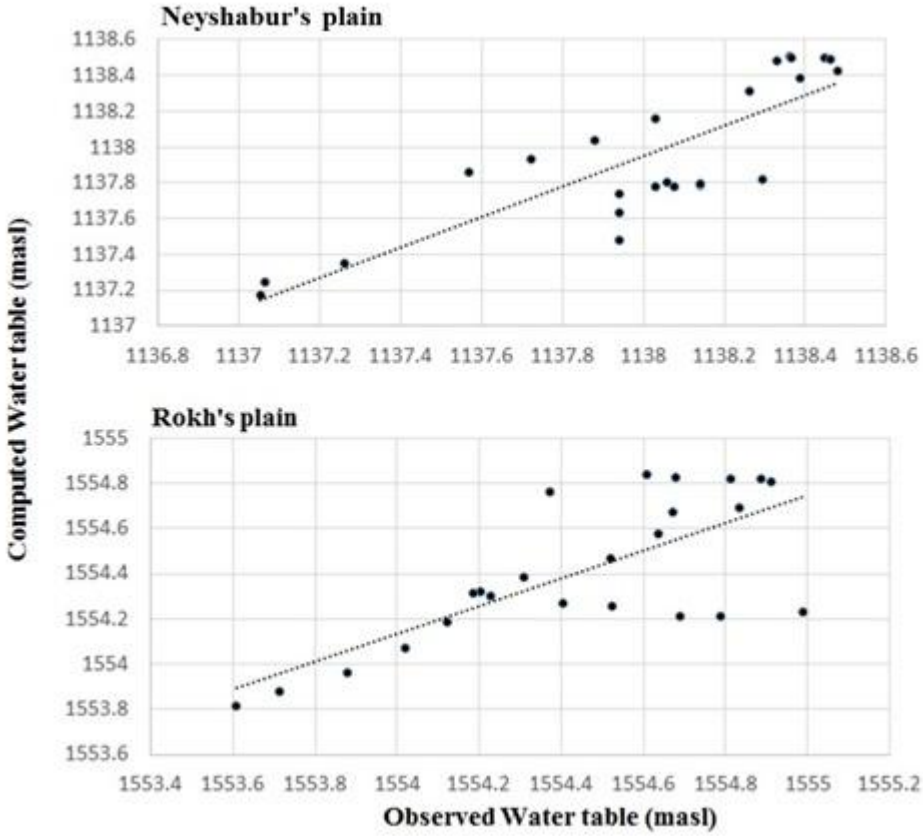

Fig. 11- Correlation between computed and observed aquifer water table during validation period

شکل ۱۱- همبستگی سطح ایستابی محاسباتی و مشاهداتی در دشت نیشابور و رخ در دوره‌ی اعتبارسنجی

به طوری که همبستگی بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی رواناب سطحی و سطح ایستابی دشت‌های نیشابور و رخ به ترتیب برابر با ۹۲٪، ۷۱٪ و ۵۴٪ بوده است. مقادیر کم در ضریب همبستگی (به خصوص در دشت رخ) دلالت بر عدم دقت کافی در سطح ایستابی آبخوان و دبی تخلیه از آب زیرزمینی و دیگر داده‌های ورودی به مدل دارند. به طور کلی با توجه به سابقه کاربرد مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی استفاده شده در این تحقیق در حوضه‌های آبریز مختلف و سابقه طولانی کاربرد مدل‌های تانک زیرزمینی در مدل‌سازی وضعیت آبخوان‌ها به نظر می‌رسد ساختار مدل پیشنهادی قابل بسط به سایر محدوده‌های مطالعاتی در کشور نیز باشد. به طور خاص، شرایط اقلیمی متفاوت محدوده کننده استفاده از این مدل نیست زیرا مدل بیلان هیدروکلیماتولوژی مورد استفاده در این تحقیق در شرایط اقلیمی مختلف در تحقیقات مورد آزمون قرار گرفته است. البته بدیهی است استفاده کاربردی از نتایج این مدل در مناطق دیگر منوط به واسنجی آن برای منطقه موردنظر و کنترل کارایی آن است. در ارزیابی نتایج این مدل توجه به این نکته ضروری است که هدف این تحقیق، مدل‌سازی دقیق فرآیند بارش–رواناب یا مشخصات جریان‌های زیرزمینی آب نیست بلکه هدف توسعه مدلی است که بتواند به صورت کاربردی در محاسبه سریع اجزای بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی توسط وزارت نیرو و سازمان‌های تابعه مورد استفاده قرار گیرد و این مدل به هیچ عنوان جایگزین مدل‌های عددی دقیق آبخوان یا مدل‌های بارش–رواناب نخواهد بود.

برای تحقیقات آینده می‌توان هر یک از دشتهای نیشابور و رخ را به دو تانک مختلف یا بیشتر تقسیم‌بندی کرد (که در این تحقیق هر یک از دشت‌های رخ و نیشابور به صورت یک تانک در نظر گرفته شده است)، مقادیر دقیق تخلخل خاک را به دست آورد و میزان حساسیت مدل به این پارامتر را سنجید، تحلیل حساسیت بر روی بازه‌های در نظر گرفته شده انجام داد. همچنین می‌توان مدل را در مناطقی که داده‌های دقیق‌تری از مقادیر پمپاژ برای مصارف مختلف در دسترس قرار می‌دهد، پیاده‌سازی کرد.

برای افزایش دقت مدل در تخمین سطح ایستابی آب زیرزمینی بهتر است مقادیر دبی تخلیه از آبخوان با دقت بیشتری (یعنی به صورت ماهانه) برداشت شوند و اگر امکان برداشت به صورت ماهانه وجود نداشته باشد، مقادیر برداشت از آبخوان باید به ازای تمامی سال‌ها در دسترس باشد.

مدل‌های بیلان هیدروکلیماتولوژی متنوعی در ادبیات فنی معرفی شده که می‌توانند در تحقیقات بعدی به جای مدل مورد استفاده در این تحقیق جایگزین شوند. برخی از این مدل‌ها برای اقلیم خشک یا سرد و مرطوب توسعه داده شده‌اند و به همین دلیل می‌توانند کارایی بهتری در برخی از حوضه‌های آبریز با شرایط اقلیمی خاص داشته باشند. این مدل‌ها معمولا ورودی و خروجی‌های مشابهی دارند و به همین دلیل اتصال آنها به مدل تانک زیرزمینی می‌تواند از الگوی مشابه آنچه در این تحقیق پیشنهاد شده پیروی کند.

پی‌نوشت‌ها

1- Nash–Sutcliffe

۶- مراجع

Alley WM (1984) On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resources Research 20(8):1137-1149

Chen RS, Pi LC, Huang YH (2003) Analysis of rainfall-runoff relation in paddy fields by diffusive tank model. Hydrological processes 17(13):2541-2553

Finch JW (1998) Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model–sensitivity to land surface parameters. Journal of Hydrology 211(1):112-125

Izadi A (2013) Assesment of application of a coupled surface-ground water model in Neyshabur basin. PhD Dissertation, School of Agricultural, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian)

Kazumba S, Oron G, Honjo Y, Kamiya K (2008) Lumped model for regional groundwater flow analysis. Journal of Hydrology 359(1):131-140

Kendy E, Gérard-Marchant P, Todd Walter M, Zhang Y, Liu C, Steenhuis TS (2003) A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. Hydrological Processes 17(10):2011-2031

Makhlouf Z, Michel C (1994) A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. Journal of Hydrology 162(3):299-318

McCabe GJ, Markstrom SL (2007) A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. Geological Survey (US)

Nasseri M (2014) Uncertainty analysis of monthly water balance model and determination of climate change

forecasting hydrologic variables. The Geosphere Research Institute of Saitama University, Saitama, Japan 14-18

Sugawara M, Watanabe I, Ozaki E, & Katsuyama Y (1984) Tank model with snow component. Research notes/Nat. Research Center for Disaster Prevention

Thornthwaite C W and Mather J R (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Climatology 10(3)

Tingsanchali T and Gautam M R (2000) Application of tank, NAM, ARMA and neural network models to flood forecasting. Hydrological Processes 14(14):2473-2487

Yihdego Y and Khalil A (2017) Groundwater resources assessment and impact analysis using a conceptual water balance model and time series data analysis: Case of decision making tool. Hydrology 4(2):25

Zahraie B, Hoseini M (2014) Genetic algorithm and engineering optimization. Guttenberg Press (In Persian)

impacts. PhD Dissertation, School of Civil engineering, University of Tehran (In Persian)

Rao AR, Al-Wagdany A (1995) Effects of climatic change in Wabash river basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 121(2):207-215

Safavi H, Ashtiani H (2011) Engineering hydrology. Arkan Press (In Persian)

Sugawara M (1961) On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers. Japanese Journal of Geophysics 2(4)

Sugawara M (1967) The flood forecasting by a series storage type model. Int. Proc., Symp. on Floods and their Computation, Leningrad 1–6

Sugawara M (1977) Method of automatic calibration of tank model (first report). Research Notes of the National Res. Center for Disas. Prev., Japan 17:43-89

Sugawara M and Maruyama F (1956) A method of revision of the river discharge by means of a rainfall model Collection of research papers about